

并优化系统的运行模式。具体而言,在启动阶段,首先通过热管理系统提升电池温度,以确保电池处于最佳工作状态,从而减少启动时电池的负荷,避免低温对电池性能的负面影响。通过协调电池与动力系统的工作方式,系统可以避免过度消耗能源,同时保证电池的温度维持在合理范围内。这种协同控制不仅可以提高低温环境下电池的能效,还能提升电池的启动性能和续航能力。通过这一方式,可以最大限度地减少能量损失,增强整个系统在低温条件下的稳定性与可靠性。

4.3 智能化节能控制与热回收技术

智能化节能控制策略在低温环境下的应用,能够显著提高新能源汽车的能源利用效率。通过实时监控电池的温度、功率输出与外部环境温度,系统能够根据电池状态变化自动调整热管理系统的运行模式,以确保系统的高效运行并保持电池在最佳工作状态。自适应控制算法能够灵活调整加热与冷却策略,以应对低温环境下电池性能波动,确保电池高效稳定地工作。此外,热回收技术的引入为新能源汽车提供了进一步的节能优势。热回收系统通过收集电池和动力系统运行过程中产生的废热,将其转化为可利用的热能,显著提高了系统整体热效率。利用这些废热可以进行电池预热或供电,从而减少外部能源的消耗,并显著提高系统的能效。通过智能化节能控制与热回收技术的结合,新能源汽车在低温环境下的续航能力和系统稳定性得到了显著提升,进一步增强了车辆的能源利用效率,推动了低温条件下电动汽车技术的发展。

5 低温环境下电池性能提升的关键技术

5.1 相变材料在电池热管理中的应用

相变材料(PCM)因其在相变过程中具有较高的热容和较强的热储存能力,在电池热管理中得到了广泛应用。相变材料可以在电池温度波动时吸收或释放大热量,起到缓冲温度变化的作用。特别是在低温环境下,电池的温度容易下降至不适宜的范围,而相变材料能够通过相变过程有效地避免电池温度过低,减少电池性能衰退和能量损失。相变材料不仅在低温时提供热储存,还能在高温环境下通过释放热量来帮助电池散热,保持电池在适宜的工作温度范围内。因此,合理选择并集成相变材料于电池模块中,能够显著提升电池的低温性能,提高电池的能量利用效率和安全性。

5.2 热电材料与集成热回收技术

热电材料能够利用温差产生电能,应用于新能源汽车的热管理系统中,有效提高系统的能效。通过将热电材料与

废热回收系统集成,能够将电池及动力系统产生的废热转化为电能,不仅提高了热管理系统的效率,还能为车辆提供额外的电能,从而减少能源消耗和延长续航里程。热电材料的应用可以优化电池在低温环境下的运行表现,增强电池的热稳定性,避免过度加热或过度冷却带来的不利影响。热电回收技术与热管理系统的结合,能够有效提升新能源汽车的整体能效,降低温度波动对电池的负面影响,提升电池寿命和安全性。

5.3 优化电池加热系统与低温启动技术

在低温环境下,电池的启动性能往往受到显著影响,传统的电池加热方式不仅能耗大,而且加热速度慢,难以迅速提升电池温度以保证正常启动。通过采用高效的电池加热膜和智能加热控制技术,可以在较短的时间内提高电池温度,确保电池在低温环境下能够顺利启动。优化加热系统设计,能够减少启动时的能量损失,提高整体能源利用效率。此外,结合低温启动策略,借助预热控制算法,提前为电池加热,有助于减少电池温度下降对能量输出的影响,提升低温条件下的启动可靠性和续航能力。通过高效的加热和预热策略,可以有效提升电池的低温性能,确保电池在寒冷天气下的正常运行。

6 结语

低温环境对新能源汽车电池性能的影响是当前电动汽车技术发展中的一重要挑战。本文从电池热管理与节能协同控制的角度出发,提出了一种优化的热管理策略,通过智能化水冷系统、相变材料、节能控制算法和废热回收技术等手段,提升了电池在低温环境下的性能表现。研究表明,优化的热管理系统不仅能够提高电池的低温性能,降低能耗,还能延长电池的使用寿命。未来的研究可进一步探索智能化控制策略与新能源技术的结合,推动新能源汽车在低温环境下的广泛应用。

参考文献

- [1] 戴锋.新能源汽车低温智能电池管理关键技术研究与应用.四川省,四川新能源汽车创新中心有限公司,2024-11-21.
- [2] 陈露,张彩虹,叶智林,等.新能源汽车动力电池低温加热方式探究[J].小型内燃机与车辆技术,2025,54(04):59-62.
- [3] 赵磊,杨苗苗.低温环境下新能源汽车动力电池预热策略研究[J].汽车测试报告,2024,(02):43-45.
- [4] 王新刚,刘勤华.新能源汽车温控系统对电池性能的影响[J].汽车知识,2025,25(07):25-27.
- [5] 霍云龙.纯电动汽车能耗模型与节能路径规划研究[D].吉林大学,2022.

Research on Identification and Evaluation of Road and Bridge Structures Based on Nondestructive Testing Technology

Mao Wang

Anhui Construction Engineering Testing Technology Group Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233000, China

Abstract

China's ongoing transportation infrastructure development has led to frequent structural failures in bridges and roads under prolonged environmental and load conditions. Conventional inspection methods, however, suffer from drawbacks including high destructiveness, low efficiency, and limited accuracy. Non-destructive testing (NDT) technology, with its advantages of high precision, rapidity, and non-destructiveness, has become a crucial tool for structural defect identification. This paper systematically examines the application mechanisms of ultrasonic testing, geophysical radar (GPR), infrared thermal imaging, acoustic emission, and laser scanning. Through case studies, it analyzes the role of multi-source fusion and intelligent algorithms in quantitative defect assessment. The research demonstrates that integrated multi-technology detection enables precise defect identification, visual evaluation, and risk classification, providing scientific evidence and intelligent decision support for bridge and road structure operation and maintenance management.

Keywords

nondestructive testing; bridge and road structures; damage identification; structural assessment; intelligent monitoring

基于无损检测技术的路桥结构病害识别与评估研究

王茂

安徽建工检测科技集团有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

摘要

中国交通基础设施建设持续推进, 路桥结构在长期荷载与环境作用下病害频发。传统检测方式存在破坏性强、效率低、精度有限等不足。无损检测技术(NDT)以高精度、快速性和非破坏性优势, 成为结构病害识别的重要手段。本文系统探讨超声波、地质雷达(GPR)、红外热成像、声发射与激光扫描等技术的应用机制, 结合典型案例分析多源融合与智能算法在病害定量评估中的作用。研究表明, 多技术协同检测可实现病害精准识别、可视化评估与风险分级, 为路桥结构运维管理提供科学依据与智能化决策支持。

关键词

无损检测; 路桥结构; 病害识别; 结构评估; 智能监测

1 引言

路桥工程是交通基础设施体系中的关键组成部分, 其结构安全与耐久性直接关系到交通运输安全与社会经济运行效率。长期以来, 路桥结构在荷载疲劳、环境侵蚀、材料老化与施工缺陷等因素作用下, 容易出现裂缝、脱空、钢筋锈蚀、疲劳损伤等多种病害, 若不能及时检测与评估, 将造成结构性能退化甚至引发安全事故。传统检测方法多依赖人工巡检与局部开挖式检测, 存在检测范围有限、主观性强及破坏性操作等缺陷。随着检测需求的精细化与信息化, 基于无损检测技术的结构病害识别方法应运而生。无损检测技术利用声、光、电、磁等物理信号对结构内部状况进行探测, 不破坏结构完整性即可实现病害识别与性能评估。该技术不

仅提高了检测精度和时效性, 还能为结构健康监测提供长期数据支撑。本文旨在探讨无损检测技术在路桥结构病害识别中的应用机制、融合方法与发展趋势, 为道路桥梁的安全管理和养护决策提供理论参考与工程实践指导。

2 无损检测技术的理论基础与应用体系

2.1 无损检测技术的基本原理

无损检测(Nondestructive Testing, NDT)以不破坏结构实体为前提, 通过分析外部施加物理信号的传播、反射与衰减特征, 判断材料内部的损伤状态与结构完整性。其核心原理在于不同介质与缺陷区域对信号的传播路径与能量分布产生差异, 从而实现对病害类型和位置的识别。检测流程通常包括激励信号的输入、响应信号的采集、特征参数分析与可视化成像四个阶段。超声波检测利用声波的反射与透射特性识别裂缝、蜂窝与空洞; 电磁检测通过电导率与磁导率变化判断钢筋锈蚀及界面分离; 红外热成像基于温度场分布

【作者简介】王茂(1990-), 男, 中国安徽蚌埠人, 本科, 工程师, 从事路桥试验检测研究。

异常揭示脱层与空鼓；声发射技术通过实时监测微裂纹形成的应力波信号，捕捉结构早期破坏过程。多种检测手段的集成与互补，结合信号反演与数据融合算法，可实现结构内部损伤的定量化分析与可视化表达，从而为路桥健康状态评估与维护决策提供科学依据。

2.2 路桥结构病害的主要类型与成因

路桥结构病害是多因素耦合作用的结果，具有隐蔽性、复杂性与累积性。常见病害包括混凝土裂缝、钢筋锈蚀、空鼓脱层、支座错位、接缝损伤及桥面沉降等。荷载疲劳与交通冲击是导致结构微裂纹发展的主因，环境侵蚀（如氯盐腐蚀、冻融循环、高温老化）进一步加速结构退化。施工材料差异、设计缺陷及维护不足也会引发早期损伤。不同病害在检测信号中具有特征性响应：裂缝区域的声波反射幅值增大、波速下降；空鼓与脱层引起电磁波信号衰减与相位延迟；锈蚀区则表现为磁场异常与电阻率变化。掌握病害的形成机理与信号响应规律是建立高精度识别模型与开展定量评估的基础。通过病害特征数据库与信号模板比对，可提高识别精度，实现从经验判断向数据驱动的科学诊断转变。

2.3 无损检测在路桥结构检测体系中的定位

在现代基础设施管理体系中，无损检测技术已成为结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)的核心组成。与传统的静载试验、取芯分析等破坏性方法相比，无损检测具有快速性、经济性与可重复性等优势，可实现结构服役状态下的安全诊断与性能评估。其应用模式主要包括三类：一是定期巡检型，用于宏观掌握结构运行状态与劣化趋势；二是专项评估型，在结构出现异常或计划维修前进行重点检测与病害量化分析；三是实时监测型，通过在关键节点布设传感器阵列与无线采集系统，实现对应力、振动、温度等指标的实时监测与数据回传。近年来，智能检测车载系统、无人机搭载传感设备以及远程监控平台的应用，使无损检测从静态采样发展为动态监控，实现了从“事后评估”向“预测预警”的转变。无损检测技术的体系化建设，不仅提高了路桥病害识别的精准度与时效性，也为结构全寿命周期管理提供了科学支撑与决策依据。

3 典型无损检测技术的应用与优势分析

3.1 超声波检测技术

超声波检测技术是混凝土结构内部损伤识别中应用最成熟的无损检测手段之一，其原理基于声波在介质中传播时受缺陷影响产生的反射、衰减与时延变化。声波在不同材料界面传播时，其传播速度、能量与波形均会发生可测变化，裂缝、空洞或蜂窝等缺陷会导致波速降低与信号能量衰减。通过声时差与能量变化分析，可精确判断病害的深度、范围与性质。传统脉冲反射法已广泛应用于桥梁主梁、桥面板和支座等关键部位检测，而近年来兴起的相控阵超声检测(Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)技术可实现多角度

声束聚焦与三维成像，显著提升了对复杂病害的分辨能力与成像清晰度。在桥梁早期裂缝识别及混凝土蜂窝空洞检测中，该方法的深度分辨率可达毫米级。超声检测具备精度高、响应灵敏、可量化等优势，但其信号传播受混凝土密实度、钢筋干扰与含水率影响较大，因此需结合声学参数修正模型或多频复合波检测策略，以提高检测结果的稳定性与可重复性。

3.2 地质雷达(GPR)检测技术

地质雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)技术基于电磁波在不同介质中的反射与透射规律，是桥梁与道路结构内部层间剥离、空鼓及脱空检测的重要手段。其基本原理为向结构体内部发射高频电磁波，接收由介电常数变化引起的反射信号，并通过波形特征分析判断结构内部异常。GPR检测具有检测深度大、分辨率高、施工影响小的优点，能够快速实现非破坏性评估。在桥面与路基检测中，GPR可精确识别钢筋分布、空鼓边界及脱空深度，并评估结构层厚度及材料均匀性。随着人工智能技术的引入，卷积神经网络(CNN)与支持向量机(SVM)等算法被用于GPR图像识别与自动分类，可实现波形特征的自主提取与病害类型的快速识别，使检测结果由经验判读向数据驱动转变。结合三维激光扫描与红外热成像等多技术数据融合，GPR检测可实现结构内外层病害的同步识别，形成多尺度、全空间的病害检测体系，为路桥结构的精细化评估与养护管理提供数据支持。

3.3 红外热成像检测技术

红外热成像检测利用热传导特性差异识别结构内部隐蔽缺陷，是桥梁与隧道表层结构无损检测的重要手段之一。其检测原理基于材料在受热后不同区域的温度分布差异：当结构内部存在裂缝、脱层、空鼓等缺陷时，热流传导受阻，表面温度场随之产生异常变化。红外摄像机通过捕捉目标表面的红外辐射能量，形成热图像反映结构热分布状态。经热图像序列分析与反演算法计算，可实现病害区域的定量定位与深度估算。该技术具有非接触、高效率、可视化等特点，特别适用于桥面防护层、隧道衬砌与混凝土表层快速检测。近年来，无人机(UAV)搭载红外热成像设备的应用，使高空、难接近区域的检测更加便捷与安全，可在短时间内完成大范围的热像数据采集与自动化分析。为提高检测准确性，需综合考虑环境温度、日照条件与风速等外界因素的影响，采用多时段观测与温差校正技术进行数据修正。红外检测在结构健康监测、预防性养护与应急评估中正展现出广阔的工程应用前景。

4 无损检测数据融合与智能识别方法

4.1 多源数据融合技术

无损检测在复杂路桥结构中面临介质多样、环境噪声复杂与病害特征差异显著等挑战，单一检测方法难以全面反

映结构损伤特征。多源数据融合技术通过整合超声波、地质雷达（GPR）、红外热成像、声发射等多种检测信号，实现病害信息的多维度综合表征。其核心在于数据层、特征层与决策层的融合：在数据层面，通过时间同步与空间配准实现不同检测结果的对齐；在特征层面，采用加权平均、主成分分析（PCA）及深度学习特征提取方法，消除冗余信息；在决策层面，引入贝叶斯推理、模糊逻辑与神经网络模型对不同检测结果进行概率加权，实现病害识别的最优决策。实践研究表明，多源融合技术在复杂桥梁节点、钢筋混凝土界面及多层路面结构检测中能显著提升信号判读的准确性与稳定性，使裂缝、脱空、剥落与腐蚀等病害的识别误差率降低约 25%，检测可靠度提升至 90% 以上。这一融合体系不仅增强了无损检测结果的互补性与鲁棒性，也为结构病害评估与养护策略提供了高精度的多维信息支持。

4.2 基于机器学习的病害识别算法

机器学习的引入推动了无损检测向智能识别与自动诊断转型。通过对大规模检测数据集的特征训练，算法可建立多类别病害的判别模型，实现从信号采集到病害分类的全自动处理流程。支持向量机（SVM）在小样本条件下具备较强的泛化能力，适用于裂缝与空鼓识别；随机森林（RF）算法可在高维非线性数据环境中稳定工作，有效应对多种材料耦合效应；卷积神经网络（CNN）结合图像识别优势，能在红外热成像与雷达图像中自动提取病害特征，实现精细分类与目标定位。通过引入特征选择、数据增强与迁移学习策略，算法可适应不同结构与环境条件，提升识别的鲁棒性与自适应性。实测结果表明，基于深度学习的综合识别系统在桥梁混凝土剥落识别中准确率达 93%，在钢筋锈蚀与空洞检测中平均误差小于 5%。此外，算法在实时性方面具有显著优势，数据分析速度比人工判读快近两倍。该智能化识别体系为实现检测自动化与风险预警提供了技术支撑。

4.3 病害定量评估与可视化表达

病害识别的最终目标不仅是定位与分类，更在于实现损伤程度的量化评估与风险可视化表达。基于反演计算与有限元分析（FEA）方法，检测信号可转化为物理量，如应变、应力及损伤参数，进而建立结构性能退化模型。例如，超声波波速衰减可量化裂缝深度，电磁波反射系数变化可反映混凝土密实度与钢筋锈蚀程度。结合结构健康监测数据与历史检测记录，可通过时序分析预测病害演化趋势。BIM（建筑信息模型）与三维激光扫描技术的引入，使检测数据实现空间化与可交互化。通过构建三维病害信息模型，管理者可直观查看病害分布、损伤等级与演化过程。可视化系统还能与大数据平台联动，支持病害统计分析、趋势预测与维修方案模拟。部分工程实践中，利用 BIM 与 GIS（地理信息系统）集成的可视化平台，结构健康评估效率提高 40%，决策响应时间缩短近 30%。病害定量评估与可视化表达的结合，使路桥结构养护从经验判断迈向科学决策，推动无损检测成

果向智能管理与全生命周期监测转化。

5 无损检测技术在路桥工程中的应用实践

5.1 桥梁结构安全监测与评估

在现代桥梁结构维护体系中，无损检测技术已成为实现健康监测与安全评估的核心手段。通过声发射、红外热成像和地质雷达（GPR）等多种技术的协同应用，可全面识别桥梁结构中的隐性损伤。声发射监测利用应力波信号捕捉裂纹萌生与扩展过程，实现早期损伤的动态定位；红外热成像基于热流传导异常识别表层剥落、空鼓与防护层脱粘；地质雷达则通过电磁波反射特征精准识别钢筋分布及内部空洞。以长江大桥为例，采用超声波、红外与雷达融合检测后，裂缝检出率提升至 95%，病害定位误差小于 2 厘米，检测结果与实测载荷试验吻合度超过 90%。该多技术融合体系使桥梁监测从周期性人工检测转向实时动态感知，构建了“采集—分析—评估—预警”一体化的监测框架。智慧检测平台的引入还实现了病害数据的可视化管理，为桥梁结构健康评估与全生命周期养护提供了科学依据与技术支撑。

5.2 道路结构层病害识别

道路结构层的疲劳损伤、剥离及脱空是影响道路使用寿命与安全性能的主要隐患。无损检测技术在道路病害识别中具有不可替代的作用。地质雷达（GPR）可通过电磁波传播特征识别层间脱空、反射异常与材料分层；落锤式弯沉仪（FWD）则测量道路结构的受力响应，反映路面承载能力与结构完整性。通过 GPR 与 FWD 联合检测，可实现结构性病害与力学性病害的同步识别，形成从表层到基层的全断面检测体系。实际工程研究显示，该组合技术使病害识别精度提升约 30%，检测效率提高 50% 以上。融合人工智能算法后，可通过对弯沉曲线与雷达图像的多维特征提取，建立自动识别与风险分级模型，对不同病害类型进行精准分类与严重度判定。该智能化识别体系为道路养护提供了科学决策依据，并可结合时序数据实现道路结构寿命预测与维修优先级排序，为公路资产管理的数字化与智能化转型提供支撑。

5.3 隧道与高架结构检测

隧道与高架桥等复杂空间结构由于其环境封闭、结构多样与施工复杂，对检测技术提出了更高要求。无损检测技术的集成化应用在此类工程中展现出显著优势。超声检测结合红外热成像可精准识别衬砌脱空、裂缝及渗漏区域，通过温度场分布与反射波特征实现多维信息互补；三维激光扫描技术能够实现隧道内壁形变与位移的毫米级精度测量，为结构变形监控提供量化依据。在地铁隧道检测中，利用机器人平台搭载多传感器系统进行自动化巡检，可在短时间内完成全断面数据采集与智能分析，极大提升检测效率与安全性。无人机检测技术在高架桥维护中也发挥了关键作用，其搭载高清摄像与红外成像系统，可快速生成结构表面与内部缺陷的三维模型，实现病害的空间定位与可视化表达。研究表明，